

Oldřich SUCHARDA¹, David MIKOLÁŠEK², Jiří BROŽOVSKÝ³

URČENÍ KRYCHELNÉ PEVNOSTI BETONU U POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH TRÁMCŮ

DETERMINATION OF CONCRETE CUBE STRENGTH FROM USED SAMPLES

Abstrakt

Příspěvek se zabývá určením pevnosti betonu v tlaku. Pro zkoušky jsou použity krychle, válce a použité zkušební trámce. Trámce byly nejprve použity u tříbodové nebo čtyřbodové zkoušky na ohyb a následně využity k určení pevnosti betonu v tlaku. Trámce jsou bez výztuže nebo s výztuží. Pro ověření výstižnosti provedených experimentů a výpočtů je využito nelineární analýzy.

Klíčová slova

Beton, pevnost, tlak, výpočet, dodatečné zkoušení, modelování.

Abstract

This paper deals with the determination of compressive strength of concrete. Cubes, cylinders and re-used test beams were tested. The concrete beams were first subjected to three-point or four-point bending tests and then used for determination of the compressive strength of concrete. Some concrete beams were reinforced, while others had no reinforcement. Accuracy of the experiments and calculations was verified in a non-linear analysis.

Keywords

Concrete, strength, pressure, calculation, additional testing, modeling.

1 ÚVOD

Pevnost betonu v tlaku je jednou z výchozích materiálových charakteristik, která se využívá při klasifikaci třídy betonu [1] a dopočtení dalších specifických vlastností betonu [5], [12] a [19]. Tyto charakteristiky se dále využívají při návrhu [9] a analýze betonových a železobetonových konstrukcí [2], [6], [7] a [11].

Pevnost betonu v tlaku se určuje destruktivními a nedestruktivními metodami, kdy destruktivní metody vyžadují přípravu zkušebních těles a jsou materiálově a časově náročné [7], [8] a [10]. Využívá se především zkušebních krychlí 150 x 150 x 150 mm nebo válců 300 mm vysokých s průměrem 150 mm. Nedestruktivní metody vykazují zpravidla větší rozptyl výsledků. Využívá se například Schmidtova kladívka.

Příspěvek se zabývá možnostmi určení pevnosti betonu v tlaku, ověřením přepočtu krychelné a válcové pevnosti [8], [10] a [14] u standardních zkušebních těles a využitím použitých zkušebních

¹ Ing. Oldřich Sucharda, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: oldrich.sucharda@vsb.cz.

² Ing. David Mikolášek, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: david.mikolasek@vsb.cz.

³ Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz.

trámců, kdy cílem je tímto způsobem získat širší statistický soubor vstupních dat pro numerické modelování. Zkušební trávce byly původně použity k tříbodové a čtyřbodové zkoušce na ohyb.

2 ZKOUŠENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU

Základní zkušební tělesa pro určení pevnosti v tlaku mají tvar krychle a válce. Normový postup uvádí [5] a [8], kdy krychelná pevnost betonu se vypočte

$$f_{ck, cube} = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

kde:

F – je maximální zatížení při porušení [N] a

A – je průřezová plocha zkušební tělesa [m²].

Zkušební těleso je ve skutečnosti při zkoušce porušeno nejen tlakem, ale také v důsledku vzniku příčného tahu. Standardní zkušební krychle mají velikost strany 150 mm. Válcová pevnost f_{ck} se určuje obvykle na válcích 300 mm vysokých o průměru 150 mm. Pro přepočet pevnosti u běžných betonů je možné využít vztahu [14]

$$f_{ck} = (0,8 \approx 0,85) f_{ck, cube} \quad (2)$$

K přepočtu je možné také využít tab. 1 a vztahu [8]

$$f_{ck, cube} = \kappa_{cy, cu} f_{ck}, \quad (3)$$

kde:

$\kappa_{cy, cu}$ – je převodní součinitel, který závisí na válcové pevnosti.

Tab. 1: Převodní součinitel pro pevnost betonu v tlaku [8]

f_{ck} [MPa]	4,0 – 25,0	25,1 – 35,0	35,1 – 50,0	50,1 – 60,0
$\kappa_{cy, cu}$	1,25	1,20	1,15	1,10

Dále se například pro přepočet pevnosti v tlaku u numerických výpočtů v programu ATENA využívá [13]

$$f_{ck} = 0,85 f_{ck, cube} \quad (4)$$

3 SLOŽENÍ BETONU A ZKOUŠEBNÍ TĚLESA

Zkušební tělesa byla vyrobena z betonu, který má pro 37 (litrů) složení: cement 42,5 R 14,06 kg, voda 6,20 kg, kamenivo 0-4 mm 29,97 kg, kamenivo 4-8 mm 5,55 kg, kamenivo 8-16 mm 29,05 kg a plastifikátor (přísada) 0,0851 l. Vybranou část zkušebních těles zobrazuje obr. 1. Všechna zkušební tělesa byla odbedněna po 24 hodinách a následně 28 dnů uložena ve vodní lázni. Čtyři zkušební krychle a šest válců mají standardní rozměry. Betonové trávce mají rozměry 700 x 150 x 150 mm. Tři byly vybetonovány bez výztuže, tři s výztuží 2x ø6 mm a tři 2x ø8 mm. Trávce byly nejprve využity pro tříbodovou nebo čtyřbodovou zkoušku na ohyb. Výztuž je z oceli B500.



Obr. 1: Zkušební tělesa po betonáži (vlevo) a zkušební trám 8C – čtyřbodový ohyb (vpravo)

4 PEVNOST BETONU V TLAKU

Pevnost betonu v tlaku se určovala na čtyřech krychlích a šesti válcích. Ukázkové zkušební těleso 6A-4 před a po zkoušce je zobrazeno na obr. 2. Poškozená krychle má typický komolý tvar. Statistické vyhodnocení uvádí tab. 2 a 3.



Obr. 2: Zkušební krychle 6A-4

Tab. 2: Krychelná pevnost

Pevnost betonu	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Dolní 5% kvantil [MPa]	ρ [kg/m ³]	Zkušební tělesa	Počet vzorků
$f_{ck,cube}$	50,21	2,42	46,22	2320,2	Krychle	4
$f_{ck,cube, \text{přepočtená}}$	50,76	0,91	49,26	2351,7	Válce	6
$f_{ck,cube, \text{přepočtená, celková}}$	50,54	1,71	47,73	2337,6	Krychle + válce	10

Pro dopočet dolního pětiprocentního kvantilu se předpokládá normální rozdělení. Dále je v tabulce uvedený přepočet pevnosti pro všechny vzorky s využitím vztahu (3). U výpočtu převodního součinitele se použilo lineární interpolace.

Tab. 3: Válcová pevnost

Pevnost betonu	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Dolní 5% kvantil [MPa]	ρ [kg/m ³]	Zkušební Tělesa	Počet vzorků
f_{ck}	44,63	0,63	43,63	2351,7	Válce	6
$f_{ck, \text{přepočtená}}$	44,20	2,13	40,70	2320,2	Krychle	4
$f_{ck, \text{přepočtená, celková}}$	44,49	1,50	42,03	2337,6	Krychle + válce	10

5 DOPOČET PEVNOSTI V TLAKU U ZKUŠEBNÍCH TRÁMCŮ

Pro dopočet pevnosti v tlaku bylo celkově použito 9 trámců. Tři trámce byly z prostého betonu, tři s výztuží 2x ø6 mm a tři 2x ø8 mm. Krytí výztuže bylo 25 mm od spodní hrany průřezu. Použitá výztuž průměru 6 mm měla pevnost 618 MPa, průměr 8 mm měl pevnost 612 MPa. Modul pružnosti oceli se přepokládá pro výpočty 200 GPa.



Obr. 3: Zkušební trám 8C-IA (vlevo) a zkušební trám 8C-IB (vpravo)



Obr. 4: Zkušební trám 8C-IIC

U zkušebních trámců se vizuální kontrolou rozdělily oblasti poškozené trhlinami a bez trhlin. Pro přepočet na 28-denní pevnost se použilo [14]. Celkové vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku pro jednotlivé typy zkušebních trámců a typu poškození uvádí tab. 4. Podrobné výsledky zkoušek pro vybraný zkušební trámec 8C jsou uvedeny v tab. 5. Uvedený zkušební trámec 8C po zkoušce čtyřbodovým ohybem zobrazuje obr. 1 vpravo. Obr. 3 a 4 zobrazují jednotlivé části zkušebního trámce u zkoušky v tlaku.

Tab. 4: Pevnost betonu v tlaku u zkušebních trámců

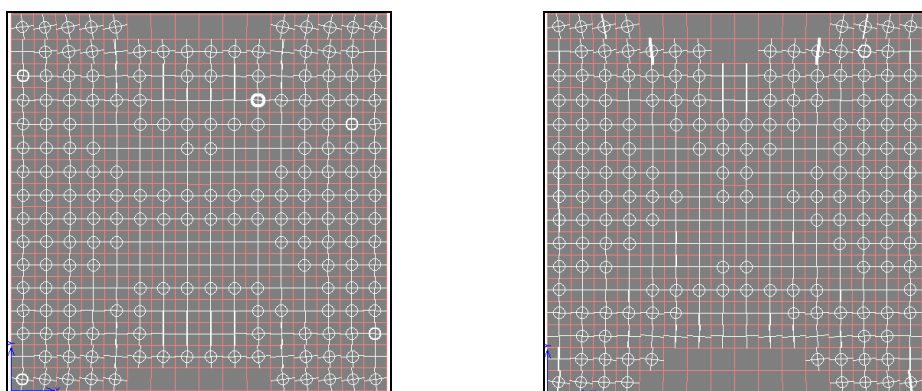
Trámce Popis	Vzorek	Pevnost [MPa] 28 dnů	Směrod. odchylka [MPa]	Dolní 5% kvantil [MPa]	Pevnost [MPa] 34 dnů	Síla [kN]	Počet Vzorků
Bez výzt.	Neporušený	49,54	2,13	46,03	50,46	1135	6
ø6 mm	Neporušený	50,26	1,40	47,96	51,20	1152	6
ø8 mm	Neporušený	49,47	1,18	47,53	50,39	1134	4
<i>Celkem trámce I</i>	Neporušený	49,79	1,71	46,99	50,72	1141	16
<i>Celkem trámce II</i>	Porušený	39,67	3,29	34,26	40,42	909	5

Tab. 5: Krychelná pevnost betonu u zkušebního trámce 8C

Popis trámce	Vzorek	Pevnost [MPa] 28 dnů	Pevnost [MPa] 34 dnů	Síla [kN]
8C-IA	neporušený	49,80	50,73	1141
8C-IB	porušený	41,37	42,15	948
8C-IIC	neporušený	49,19	50,11	1127

6 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Pro ověření výstižnosti provedených zkoušek a určení vlivu výztuže na výsledky u zkušebních těles je provedeno numerické modelování v programu ATENA [3], [4] a [13]. Protože pro nelineární analýzu v programu ATENA je nutné určit celou řadu parametrů betonu, jsou dopočteny z pevnosti betonu v tlaku podle [13] zbylé parametry. Pevnost betonu se pro numerické modelování uvažovala v tlaku 50,21 MPa a v tahu 3,26 MPa. Celkově jsou vytvořeny tři výchozí výpočetní modely patrné z obr. 5 až 8. Rozdělení na konečné prvky je vytvořeno automatickým generátorem pro typickou velikost konečného prvku 20 mm.



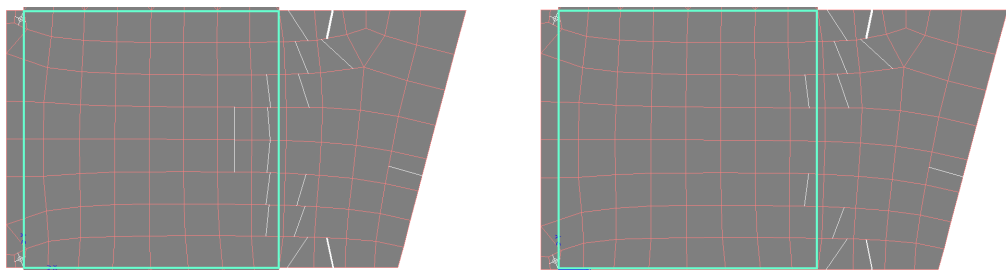
Obr. 5: Krychle – 1200 kN (vlevo: bez výztuže, vpravo: s výztuží)

Výpočet je proveden ve variantě bez a s výztuží. U výpočetního modelu standardního zkušebního tělesa je provedeno variantní řešení pro typickou velikost konečného prvku 10 a 30 mm.

Tab. 6: Maximální síla – vliv velikosti konečného prvku na výsledky u krychle

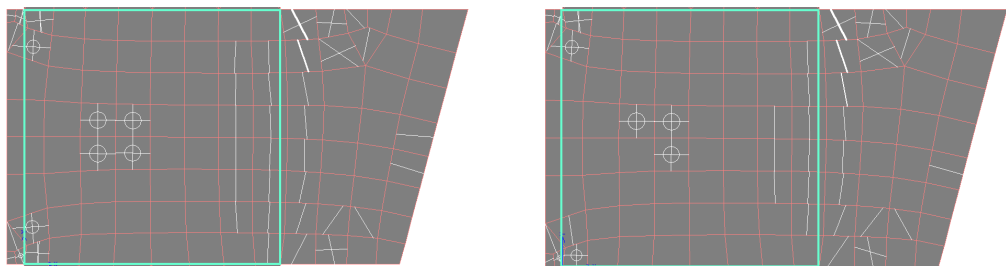
Vzorek	Síla	Velikost konečného prvku [kN] a síla			Experiment [kN]
		10 mm	20 mm	30 mm	
bez výztuže	porušení	1170	1170	1170	1128
bez výztuže	max.	1190	1200	1210	
s výztuží	porušení	1170	1180	1180	
s výztuží	max.	1200	1210	1230	

Nelineární úloha se řeší metodou konečných prvků [16] a metodou Newton-Raphson [15] a [17]. Zatížení bylo silové [13]. Výsledné pevnosti při zatěžování jsou shrnuty v tab. 6 a 7. Typický průběh porušení u zkušební krychle pro zatížení 1200 kN je zobrazen na obr. 5. Rozdíl porušení betonu je u krychlí bez a s výztuží minimální. Průběh porušování zkušebních těles u trámce je patrný z obr. 6 až 9. V tab. 6 jsou uvedeny výsledky maximální síly v závislosti na velikosti konečného prvku.



Obr. 6: Zkušební trám 8C-IIC – 800 kN (vlevo: bez výztuže, vpravo: s výztuží)

Vypočtený výsledný stav porušení části zkušebního trámce 8C-IIC při zatížení 1130 kN zobrazuje obr. 7.



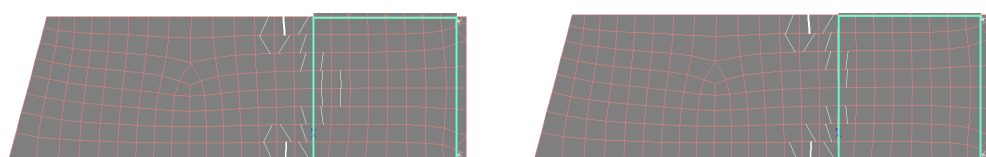
Obr. 7: Zkušební trám 8C-IIC – 1130 kN (vlevo: bez výztuže, vpravo: s výztuží)

U části zkušebního tělesa 8C-IIC došlo nejprve v průběhu zkoušky a také u numerického výpočtu v převísle části ke vzniku tažené oblasti. Průběh porušení při 800 kN zobrazuje obr. 6. Tahové trhliny jsou již po celé výšce u průřezu modelu nevyztuženého trámce. Výsledky pro vyztužený trámec se mírně odlišují.

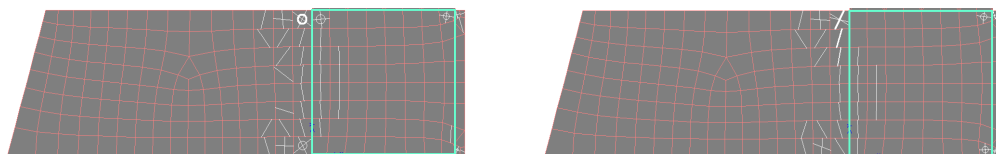
Průběh porušení pro druhou část zkušebního trámce 8C je zobrazen na obr. 8 a 9. Podobně jako v předešlé části jsou nejprve zobrazeny výsledky pro zatížení 800 kN a následně pro sílu 1050 kN. Průběh porušení je podobný. Výsledné zatížení se již mírně odlišuje. Vliv výztuže u modelovaných částí betonového trámce 8C-IA a 8C-IIC a standardní zkušební krychle je malý. Hodnoty maximální síly z experimentu a výpočtů zkušebního trámce 8C a krychle uvádí tab. 7.

Tab. 7: Maximální síla u zkušebního trámce 8C a standardní krychle

Trámce popis	Vzorek	Max. síla porušení [kN]	Max. síla [kN]	Lin. vyp. [kN]	Experiment [kN]
Krychle	bez výztuže	1170	1200	1130	1128
Krychle	s výztuží	1180	1210		
8C-IA	bez výztuže	1050	1080		1141
8C-IA	s výztuží	1180	1220		
8C-IIC	bez výztuže	1130	1180		1127
8C-IIC	s výztuží	1150	1160		



Obr. 8: Zkušební trám 8C-IA – 800 kN (vlevo: bez výztuže, vpravo: s výztuží)



Obr. 9: Zkušební trám 8C-IA – 1050 kN (vlevo: bez výztuže, vpravo: s výztuží)

7 ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá určením pevnosti v tlaku pro účely analýzy železobetonových konstrukcí [18]. Z porovnání skutečného poměru krychelné a válcové pevnosti a použitého přepočtového součinitele dle (3) vyplývá, že jejich rozdíl je velmi malý. Použitím lineární interpolace pro dopočet přepočtového součinitele se rozdíl dále zmenší. Výsledná průměrná krychelná pevnost pro standardní zkušební tělesa je 50,54 MPa a válcová pevnost je 44,49 MPa. Z výsledků zkoušek trámů a nelineární analýzy vyplývá, že vliv použité výztuže do $\varnothing 8$ mm u části nepoškozených trámů pro určení pevnosti betonu v tlaku je minimální. Délka zkušebního tělesa má také malý vliv. Rozhodující vliv má velikost zatěžované plochy. U provedených zkoušek se využívalo ocelových podložek, jak je patrné z ilustračních fotografií. Výsledná krychelná pevnost se od pevnosti na zkušebních krychlích lišila pouze o 0,42 MPa. Výsledné porušení zkušebních těles trámů se odlišovalo od standardního zkušební tělesa krychle. Směrodatná odchylka pevnosti betonu v tlaku je téměř stejná. U poškozených vzorků s trhlinami dosahovala pevnost pouze 78,5% krychelné pevnosti betonu na standardních zkušebních vzorcích. Numerické výpočty dobře vystihují provedené zkoušky u standardní zkušební krychle a také u části betonových trámů. Vliv velikosti konečného prvku u zvolených výpočetních modelů byl zanedbatelný.

PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků České republiky prostřednictvím koncepčního rozvoje Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava na Fakultě stavební.

LITERATURA

- [1] CEB - FIP Model Code 1990: *Design Code*. by Comite Euro-International du Beton, Thomas Telford, 1993. ISBN 978-0727716965.
- [2] ČAJKA, R., BURKOVIC, K., MATEČKOVÁ, P., STARÁ, M. Problematika posouzení stávajících železobetonových konstrukcí. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební. 2011, roč. 11, č. 2, s. 9-14. ISSN 1213-1962.
- [3] ČERVENKA, V., ČERVENKA, J., PUKL, R. *ATENA - A tool for engineering analysis of fracture in concrete*. Sadhana-academy proceedings in engineering sciences, 2002, roč. 27, str. 485-492, ISSN 0256-2499.
- [4] ČERVENKA, J., PAPANIKOLAOU, V., K. *Three dimensional combined fracture – plastic material model for concrete*. Int. J. Plasticity. 2008, 24, 12, pp. 2192–2220, ISSN 0749-6419.
- [5] ČSN EN 206-1: Beton - část 1: specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2001. 72 s.
- [6] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [7] ČSN ISO 13822: Zásady navrhování konstrukcí- hodnocení existujících konstrukcí. Praha : Český normalizační institut, 2005. 72 s.
- [8] ČSN 73 1317: Stanovení pevnosti betonu v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 1987. 11 s.
- [9] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut, 2006. 213 s.
- [10] ČSN EN 12504-1 (73 1303): Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2009. 12 s.
- [11] KRÁLIK, J., KRÁLIK, J. Seismic analysis of reinforced concrete frame-wall systems considering ductility effects in accordance to Eurocode. Engineering Structures. 2009, roč. 31, č. 12, str. 2865-2872. ISSN 0141-0296.
- [12] MIKOLAŠEK, D., SUCHARDA, O., BROŽOVSKÝ, J. Přístup k modelování a analýze železobetonových konstrukcí. Konstrukce. 2011, roč. 10, č. 5, s. 12-17. ISSN 1213-8762.
- [13] Programový systém ATENA 2D: Theory Manual. Praha: Červenka Consulting, 2000.
- [14] PROCHÁZKA, J. a kol. Navrhování betonových konstrukcí 1. 2 vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2006. ISBN 80-903807-1-9.
- [15] RAVINGER, J. Programy – statika, stabilita a dynamika stavebních konstrukcí. Alfa, Bratislava, 1990.
- [16] ROMBACH, G. *Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2007. ISBN 978-3-433-01701-2.
- [17] RELEASE 11 DOCUMENTATION FOR ANSYS, SAS IP, INC., 2007.
- [18] SUCHARDA, O., BROŽOVSKÝ, J. Pružnoplustické modelování železobetonového nosníku: implementace a srovnání s experimentem. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební. 2011, roč. 11, č. 1, s. 237-244. ISSN 1213-1962.
- [19] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., VODÁK, O., KERŠNER, Z. Lokalizace průběhu porušování v betonových vzorcích stanovená pomocí akustické a elektromagnetické emise a numerických simulací. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební, 2011, roč. 11, č. 2, s. 269-278. ISSN 1213-1962.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Alois Materna, CSc., MBA, ČKAIT, Praha.

Ing. Kamila Kotrasová, PhD., Katedra stavební mechaniky, Stavební fakulta, TU v Košiciach.